

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta stavebních  
Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

Vliv vlhkosti na fyzikálně mechanické vlastnosti historických zděných materiálů

The Influence of moisture on physical and mechanical properties of historical brick  
materials

Student:

Lukáš Bud'o

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Libor Žídek

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta stavební  
Katedra stavebních hmot a hornického stavitelství

## Zadání bakalářské práce

Student: **Lukáš Bud'o**  
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství  
Studijní obor: 3647R019 Stavební hmoty a diagnostika staveb  
Téma: **Vliv vlhkosti na fyzikálně mechanické vlastnosti historických zdících materiálů**  
**The influence of moisture on physical and mechanical properties of historical brick materials**

Zásady pro vypracování:

Sledování vlhkosti u historických staveb je stále aktuální téma. Bakalářská práce bude zaměřena na změnu fyzikálně mechanických vlastností v přímé závislosti na vlhkosti prostředí.

1. Úvod.
2. Přehled stavebních materiálů pro zděné konstrukce.
3. Vybrané příklady vad a poruch zděných konstrukcí.
4. Experimentální část – sledování změn fyzikálně mechanických vlastností stavebních materiálů vlivem vlhkosti.
5. Vyhodnocení experimentální části.
6. Závěry a doporučení.

Seznam doporučené odborné literatury:


Svoboda, L. a kol. : Stavební hmoty, JAGA Bratislava, 2005, 471 s., ISBN 80-8076-007-1.  
Solař, J.: Poruchy a rekonstrukce zděných staveb, Grada Publishing Praha, 2008, 192 s., ISBN: 978-80-247-2672-4.  
Balík, M., Solař, J.: 100 tradičních stavebních detailů – Ochrana proti vodě, Grada Publishing Praha, 2011, 219 s., ISBN: 978-80-247-3656-3.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Libor Židek**

Datum zadání: 31.10.2013

Datum odevzdání: 05.05.2014

  
Ing. Libor Židek  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Darja Kubečková, Ph.D.  
děkanka fakulty

### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....  
podpis studenta

### Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití školního a § 60 -školní dílo
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst.3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě.....

.....  
podpis studenta

## **Anotace**

Vady a poruchy vlivem vlhkosti jsou v současnosti stále aktuálním problémem u mnoha historických staveb. Hlavním konstrukčním prvkem těchto staveb jsou cihly, které podléhají degradačním procesům vlivem vlhkosti a statického namáhání.

Cílem práce je identifikovat a porovnat fyzikálně mechanické vlastnosti vybraných cihelných prvků, vystavených rozdílným teplotním a vlhkostním vlivům.

Teoretická část se zabývá vlastnostmi zdících prvků a působení vlhkosti na konstrukce, včetně identifikace vybraných vad a poruch.

Experimentální část je zaměřena na vyhodnocení vlastností zdících prvků, pomocí praktických zkoušek IN SITU a laboratorních měření u vybraného historického objektu Löw-Beerovy vily v Brně.

**Klíčová slova:** Cihly, Vlhkost, Fyzikálně mechanické vlastnosti cihel

## **Anotation**

Defects and faults are still quite important issues when dealing with historical buildings nowadays. The main structural elements of these are bricks which are subjects to degradation processes due to moisture and static stress.

The goal of this thesis is to identify and compare the physical and mechanical properties of selected elements of brick exposed to different temperature and humidity conditions.

Theoretical part is concerned with features of masonry units and effects of moisture on the structure including the identification of selected defects and faults.

The focus of experimental part is evaluation of the properties of masonry units, using practical tests IN SITU and laboratory measurements of selected historical building Löw-Beer Villa in Brno.

**Keywords:** Bricks, Moisture, Physical and mechanical properties of bricks

## Obsah

|                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Seznam použitého značení.....</b>                             | <b>1</b>  |
| <b>1. Úvod .....</b>                                             | <b>3</b>  |
| <b>2. Přehled stavebních materiálů pro zděné konstrukce.....</b> | <b>4</b>  |
| 2.1 Historie zdiva.....                                          | 4         |
| 2.2 Cihelné zdivo.....                                           | 5         |
| 2.2.1 Nepálené cihly.....                                        | 5         |
| 2.2.2 Pálené cihly.....                                          | 6         |
| 2.3 Vlastnosti stavebních materiálů.....                         | 8         |
| <b>3. Vybrané příklady vad a poruch zděných konstrukcí .....</b> | <b>11</b> |
| 3.1 Transport vody .....                                         | 11        |
| 3.1.1 Difúze.....                                                | 11        |
| 3.1.2 Kapilární vedení vlhkosti.....                             | 12        |
| 3.1.3 Kondenzace.....                                            | 13        |
| 3.1.4 Sorpce.....                                                | 14        |
| 3.1.5 Vysychání.....                                             | 14        |
| 3.2 Zdroje vlhkosti v konstrukci.....                            | 15        |
| 3.2.1 Důsledky vlivu vlhkosti.....                               | 17        |
| 3.3 Příčiny vad a poruch .....                                   | 19        |
| 3.4 Vliv solí v konstrukcích.....                                | 20        |
| 3.4.1 Destruktivní vlivy solí.....                               | 21        |
| 3.4.2 Důsledky působení solí.....                                | 22        |
| <b>4. Experimentální část.....</b>                               | <b>23</b> |
| 4.1 Cíle experimentální části .....                              | 23        |
| 4.2 Stručný popis a historie objektu.....                        | 24        |
| 4.3 Zkušební postupy .....                                       | 25        |
| 4.3.1 Měření vlhkosti.....                                       | 25        |
| 4.3.2 Ověření pevnosti tlaku metodou lokálního porušení.....     | 26        |
| 4.3.3 Stanovení skutečných rozměrů .....                         | 26        |
| 4.3.2 Stanovení objemové hmotnosti .....                         | 27        |
| 4.3.5 Zkouška nasákavosti cihelných prvků.....                   | 27        |
| 4.3.6 Zkouška pevnosti v tlaku .....                             | 28        |

|                                                 |           |
|-------------------------------------------------|-----------|
| <b>5. Vyhodnocení experimentální části.....</b> | <b>29</b> |
| 5.1 Výsledky měření IN SITU .....               | 29        |
| 4.3.1 Vyhodnocení měření vlhkosti .....         | 29        |
| 4.3.2 Pevnost v tlaku lokálním porušením.....   | 33        |
| 5.2 Výsledky laboratorního měření.....          | 34        |
| 5.2.1 Určení základních vlastností .....        | 35        |
| 5.2.2 Nasákavost .....                          | 36        |
| 5.2.3 Nárůst vlhkosti.....                      | 38        |
| 5.2.4 Pevnost v tlaku.....                      | 39        |
| 5.2.5 Vliv vlhkosti na pevnost.....             | 41        |
| <b>6. Závěr .....</b>                           | <b>44</b> |
| <b>Poděkování.....</b>                          | <b>46</b> |
| <b>Seznam použité literatury .....</b>          | <b>47</b> |
| <b>Seznam tabulek .....</b>                     | <b>49</b> |
| <b>Seznam obrázků .....</b>                     | <b>20</b> |
| <b>Seznam vzorců .....</b>                      | <b>51</b> |
| <b>Seznam příloh.....</b>                       | <b>52</b> |



## Seznam použitého značení

- $A_z$  plocha zatěžování [ $\text{mm}^2$ ]  
 $c$  kalibračního koeficient [-]  
 $d$  tloušťka zdiva [cm]  
 $F$  maximální zatěžovací síla [kN]  
 $\delta$  součinitel difúze vodní páry [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]  
 $g$  tíhové zrychlení [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ]  
 $h$  výška vztlínání [m]  
 $m$  hmotnost vzorku před vysušením [kg]  
 $m_w$  hmotnost zkušebního vzorku před vysušením [kg]  
 $m_o$  hmotnost zkušebního vzorku po vysušení [kg]  
 $m_n$  hmotnost saturovaného vzorku [kg]  
 $m_s$  hmotnost vysušeného [kg]  
 $\mu$  faktor difúzního odporu  
NV hmotnostní nasákavost [-], [%]  
 $\sigma$  povrchové napětí kapaliny [N/m]  
 $P$  tlak nasycené vodní páry [kPa]  
 $P_o$  tlak nenasycené vodní páry [kPa]  
 $R$  plynová konstanta [ $\text{J/kg} \cdot \text{m}^3$ ]  
 $R_m$  výběrový průměr vyšetřované pevnosti zjištěný z „n“ zkušebních těles  
 $R_{c1}$  pevnost v místě zkoušení [MPa]  
 $\Delta R_o$  průměr hodnot naměřených odporovým vlhkoměrem [%]  
 $\Delta R_c$  průměr hodnot naměřených odporovým vlhkoměrem na dané cihle [%]  
 $r$  poloměr kapiláry [m]  
 $\rho$  měrná hmotnost [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $S$  faktor závisující na druhu stavebního materiálu [ $\text{cm}^2 \cdot \text{dny}^{-1}$ ]  
 $S_r$  výběrová směrodatná odchylka [MPa]  
 $\Theta$  úhel smáčení mezi kapalinou kapiláry [°]  
 $\sigma$  povrchové napětí kapaliny [ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ]  
 $T$  absolutní teplota [K]

$t_n$  součinitel pro odhad dolní hranice konfidenčního intervalu průměru

$V$  objem [ $\text{m}^3$ ]

$w$  vlhkost %

$w_o$  kalibrovaná vlhkost [%]

## 1. Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem vlhkosti a teploty na fyzikálně mechanické vlastnosti historických zdících materiálů. Voda ve stavebních materiálech ovlivňuje řadu jejich vlastností a její výskyt v konstrukci může být ve všech skupenstvích.

I v současné době jsou poruchy vlivem vlhkosti tématem, které je stále aktuální. Na mnoha stavbách je nutné řešit poruchy způsobené vlhkostí a hledá se optimální technické a ekonomické řešení, které bude mít dlouhodobý účinek a zachová tak stavbě trvanlivost. U historických staveb musí být řešení problematiky velmi citlivé, neboť stavba nemá jen funkční hodnotu, ale mnohdy také kulturně a architektonicky přidané hodnoty.

S touto problematikou jsem byl blíže seznámen jako stážista u společnosti Infram a.s., která působila jako stavební dozor u rekonstrukce vily rodiny Löw-Beerů v Brně. Veškeré výsledky měření IN SITU a původ vzorků zkoušených laboratorně, pochází právě z tohoto objektu. Na této stavbě probíhaly mimo jiné i sanační opatření, izolace proti působení vlhkosti ve spodní části objektu, kde bylo při provádění prací nalezeno více druhů cihelných prvků.

V bakalářské práci jsem porovnával fyzikálně mechanické vlastnosti odebraných zdících prvků za různých teplotních i vlhkostních poměrů a získané hodnoty jsem porovnával mezi sebou a se standardy současných keramických materiálů pro zdivo.

## 2. Přehled cihelných prvků

### 2.1 Historie cihelného zdiva

Cihelné zdivo díky své dostupnosti, fyzikálním a stavebně technickým vlastnostem nahradilo přírodní kamen a historicky je považováno za nejstarší nepřírodní stavební materiál.

Zprvu se jednalo o cihly nepálené, které byly sušeny na slunci. První zděné stavby s těmito druhy cihel se nacházely v Mezopotámii a byly postaveny zhruba devět tisíc let před naším letopočtem, u nás jsou nejznámějším druhem těchto cihel tzv. vepřovice. Pálené cihly mají své počátky asi o tři tisíce let později.

Důležitou roli v historii cihlářské výroby měl vývoj technologie. Do počátku 19. století se cihly vyráběly ručně a vypalovaly se v periodických pecích většinou v milířích. Postupně docházelo k nástupu mechanizace, vývoj se v první řadě zaměřil především na lisy a stroje pro přípravu suroviny. Průmyslový rozvoj znamenal nejen zvýšení efektivity, ale také kvality výsledných výrobků. Na konci století došlo také k inovacím u mechanizace a manipulace výlisků, výsušků i hotových výrobků. Prvním krokem bylo zavedení etážového zavážení v kombinaci s plnoautomatickým ukládání výlisků. Modernizovány byly také sušárny a pece, kde milíře byly nahrazeny periodickými pecemi nejprve kaselovými později kruhovými a kanálovým, což pomohlo ke snižování energetických nároků na výrobu.

Výrazným mezníkem, který způsobil přechod ze sezónní výroby na celoroční bylo zavedení umělých sušáren umístěných především nad pecemi. Nárůstem dopravy, kultury fyzické práce včetně centralizace do velkých výrobních továren se zúročila kapacita cihlen a výroba ztratila statut lokálního charakteru. Postupem času se cihelná výroba stala plně mechanizovanou a automatizovanou.

Rozvoj výroby nebyl pouze závislý na vývoji technologie mechanizace, ale i na inovaci výrobků samotných, ať už se jednalo o rozličné rozměry, surovinové složení, teplotu výpalu aj.

Na začátku 19. století začala výroba děrovaných cihel, která se stala základem pro moderní keramické tvárnice vyráběné začátkem 20. století.

V roce 1852 začala výroba vápenopískových cihel, nejprve byly sušeny a lisovány na vzduchu, později od roku 1880 se začaly ukládat do autoklávu, což výrazně zlepšilo jejich vlastnosti. Cihelné zdivo jako hlavní stavební materiál, začalo být vytlačováno v druhé polovině 19. století rozvojem betonu ve všech jeho formách. [1]

## 2.2 Cihelné zdivo

*„Keramické výrobky se řadí mezi silikáty. Jsou to anorganické výrobky nekovové povahy, které se získávají tepelným zpracováním nejčastěji přírodních surovin obsahující převážně oxidy křemíku.“ [7]*

Cihly jsou zdící prvky, dělaná jako kusová staviva u kterých důležitou charakteristikou jsou rozměry. Ze základních druhů prvků dělíme dle výroby na nepálené a pálené.

### 2.2.1 Nepálené cihly

Jako hliněné cihly jsou označovány nepálené cihly z hlíny, které jsou určeny k vyzdívání za použití hliněných nebo vápenných malt.

Hliněné cihly a jejich druhy byly definovány normou DIN 18951, v současné době neexistuje norma přesně definující druhy a vlastnosti nepálených cihel. Dle základních rozměrů můžeme prvky dělit na:

#### **Hliněné kvádry**

Tyto velkoformátové hliněné cihly byly nejčastěji formovány v rozměrech 12 x 25 x 38 cm. Jejich nevýhodou byla velká hmotnost a pracnost při výstavbě.

## Nepálené cihly

U nás nejznámějším druhem těchto cihel jsou tzv. vepřovice, což jsou nelisované hliněné cihly s vláknitými příměsemi nejčastěji o rozměrech 12 x 12 x 25 cm nebo 24 x 24 x 7 cm. Průmyslově vyráběné prvky byly lisovány, což urychlilo výrobu, ale zvýšilo i jejich pevnost. Tyto cihly se dodávaly z pravidla ve formátech:

- 6,5 x 12,0 x 25 cm (říšský formát)
- 5,1 x 11,5 x 24 cm (DF = tenký formát)
- 7,1 x 11,5 x 24 cm (NF = normální formát)
- 7,1 x 11,5 x 30 cm (formát pro kláštery, kostely a zámky)
- 11,3 x 11,5 x 24 cm (2DF)

Nevýhody těchto cihelných prvků jsou především nedostatečná odolnost proti mrazu, vodě, velká hmotnost a u děrovaných prvků jejich nízká pevnost. [5.]

### 2.2.2 Pálené cihly

Rozměry výrobků jsou dány výrobcem. Odchyłky od těchto rozměrů by měly být v určených tolerancích. Pálené cihly byly v průběhu let přizpůsobovány požadavkům na jejich nároky a funkce, jako jsou statické, tepelně a zvukově izolační i trvanlivé, přičemž je snaha uchovat jejich estetičnost.

Vlastnosti prvků pro zhotovení zděných konstrukcí jsou obsaženy v normě ČSN EN 771-1. Ta dělí pálené zdící prvky do dvou skupin:

- Prvky LD  
s objemovou hmotností menší než 1000 kg/m<sup>3</sup>, použité v chráněném zdivu
- Prvky HD
  1. všechny pálené zdící prvky určené pro použití v nechráněném zdivu
  2. prvky s objemovou hmotností větší než 1000 kg/m<sup>3</sup> použité v chráněném zdivu







vlastnosti přetvárné (deformační) nebo jako vlastnosti pevnostní, podle toho, popisují-li chování materiálu zachovávajícího si ještě svou celistvost, nebo nacházejícího se již ve fázi porušování. Mechanické vlastnosti jsou důležité především pro statickou funkci objektů a jsou definovány především **pevností a modulem pružnosti a přetvárností**. [4]

Jedna z nejdůležitějších vypovídající vlastností stavebních materiálů je jejich **pórovitost**. Porozita je obsah vzduchových dutin, pórů, ve stavební hmotě. Je udáván jako podíl objemu vzduchových pórů v materiálu v objemových procentech. Pórovitost je zdrojem mnoha informací a ovlivňuje řadu vlastností jako jsou: mechanické, permeabilní a deformační. Při pozorování pórovitého materiálu můžeme určit texturu a strukturu daného prvku. Póry lze charakterizovat také podle velikosti a tvaru. Na základě velikosti lze póry dělit na mikropóry ( $>10^{-7}$  m), kapilárně aktivní póry ( $10^{-7} - 10^{-7}$  m), makropóry ( $<10^{-7}$  m). Velikost pórů může ovlivnit například vlastnosti jako permeabilitu a nasákavost. Dle tvaru dělíme na otevřené, kde se může do pórů dostat voda a póry uzavřené, které jsou pro vodu volně nedostupné.

Každá pórovitá látka obsahuje vlhkost, která tak tvoří nedílnou součást i konstrukčních materiálů (cihly, beton, kámen). Vlhkost se může vyskytovat v několika formách: volná, vázaná, kapilární, absorbovaná nebo chemicky vázaná. V porézních materiálech se uplatňuje také několik jevů:

- **Smáčivost a nesmáčivost** jsou definovány jako vztah mezi tuhou látkou (podkladem) a kapalinou (zde vodou). Smáčivý systém má tendence potahovat povrch tenkou vrstvou kapaliny. Nesmáčivý systém je charakterizován vytvořením co nejmenší styčné plochy, kapalina se sbalí do kuličky, kapky. Cihelné prvky jsou jako řada jiných materiálů smáčivé, tento jev lze upravit na nesmáčivý pomocí hydrofobizačních přípravků. Smáčivost lze charakterizovat pomocí tzv. smáčecího úhlu  $\theta$ . V závislosti na povrchovém napětí a smáčecího úhlu lze definovat výšku **vzlínání**  $h$ . [3]
- **Nasákavost** je charakterizována jako maximální množství vlhkosti, které v materiálu může být obsaženo. [4]

- **Mrázuvzdornost** je vlastností látky odolávat cyklickému zmrazování v nasyceném stavu. Se zvyšující pevností se zvyšuje i odolnost. Pokud je materiál měkčí lépe odolává krystalické přeměně vody na led (zvětšení objemu až o 9%).
- **Odolností vůči působení solí** získá materiál schopnost odolávat krystalickým tlakům krystalů solí, které vznikají po odpaření koncentrované vody.
- Pórovitost a vlhkost v konstrukci ovlivňuje také **tepelnou vodivost**. Nejnižší tepelnou vodivost mívají velmi pórovité látky například tepelné izolace.

### 3. Vybrané příklady vad a poruch zděných konstrukcí.

#### 3.1 Transport vody a vlhkosti

##### 3.1.1 Difúze

Je jevem, který se projevuje u pórovitých materiálů oddělujících rozdílné prostředí s rozdílným tlakem vodních par a kde probíhá. Transport těchto par je z míst s vyšší koncentrací do míst s nižší koncentrací, čímž se vyrovnávají dané rozdíly, tento jev se nazývá difúze.

Difúze působí v obalových konstrukcích za rozdílu teplot vytápěných interiérů a nevytápěných exteriérů, kde vzniká tok vlhkosti a tepla. Směr difúzního toku je z míst teplejších do míst chladnějších.

Mechanismy difúze jsou gradient teploty nebo-li termoosmóza a gradient tlaku. Termoosmóza zajišťuje přívod vodních par do míst s vyšší teplotou a je opačného působení, než difúze. Směr toku vodní páry ovlivněné gradientem tlaku je opačného směru oproti toku s vlivem gradientu teploty. Výsledný součet sil a transport vlhkosti má směr k vnějšímu nebo vnitřnímu líci obalové konstrukce. Většinu roku má směr difúzního toku z vnitřních prostorů ven z objektu. V zimních měsících dochází k snížení parciálního tlaku vodních par venku, díky užívání objektů je parciální tlak vodních par vyšší. V létě dochází k obrácení směru difúzního toku, což je zanedbatelné neboť teplotní rozdíly mezi vnějším a vnitřním prostředím nejsou tak markantní.

Difúze probíhá ve velkých pórech, kdežto u malých propojených kapilár vyplněných vodou se uplatňuje transmise. Tyto jevy mohou probíhat současně, ale jejich orientace nemusí být stejná.

U schopnosti propouštět vodní páry, v závislosti na tloušťce materiálu, jsou důležitými veličinami součinitel difúze vodní páry  $\delta$  a faktor difúzního odporu  $\mu$ , které jsou používány k výpočtu celkového difúzního odporu na základě součtu odporů všech vrstev konstrukce.

Skladba vrstev obalové konstrukce je většinou koncipována tak, aby difúzní odpor směrem k venkovnímu líci klesal.

### 3.1.2 Kapilární vedení vlhkosti

Tato transportní vlastnost je typická u smáčivých materiálů. Když dojde ke kontaktu pórovitého materiálu s vodou, dochází k nasátí vody póry, přičemž není důležitý jejich sklon. Výška vzlinutí se liší dle typu pórovitosti, jemně pórovité a hutné materiály mají tuto výšku mnohem vyšší než ty s velkými póry a jejich sací síly jsou o mnoho silnější. Hrubě pórovité materiály mají výšku vzlinutí relativně malou a jejich sací síly jsou slabé, ačkoli rychlost nasání vody je velká.

S kapilárním vedením vlhkosti je možno se setkat u vzlínající vlhkosti, což je velmi častá porucha konstrukcí, kde působí zemní vlhkost. Vzlinající vlhkost vychází z principů kapilární elevance. Ta je definována jako rozdíl výšky hladiny kapaliny v kapiláře proti úrovni hladiny v okolí. Je to jev vyvolávající kapilární síly mezi molekulami vody a povrchem látky. Povrchové napětí způsobuje, že sloupec kapaliny v kapiláře se pohybuje ve směru výslednice sil. Maximální výška vzlínání lze vypočítat dle vztahu [3]:

$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \Theta}{r \cdot \rho \cdot g} \quad [\text{m}] \quad (1)$$

kde je

$\sigma$  povrchové napětí kapaliny [N/m]

$\Theta$  úhel smáčení mezi kapalinou kapiláry [°]

$r$  poloměr kapiláry [m]

$\rho$  měrná hmotnost kapaliny [kg/m<sup>3</sup>]

$g$  tíhové zrychlení [kg.m<sup>-3</sup>/s<sup>-1</sup>]

Vzlínání ovlivňují především faktory jako poloměr pórů, tvar pórů a smáčecí úhel  $\Theta$ . Menší poloměr zvýší výšku vzlínání, kdežto větší poloměr zvětší objem transportující vlhkosti ve zdivu.

Pokud cosinus smáčecího úhlu  $\Theta$  na styku tuhé a kapalné fáze nabývá záporných hodnot

(<90°), pak i výška vztlínání je záporná a dochází ke kapilární depresi což je jev, který se uplatňuje u hydrofobizačních a jiných látek zabraňující smáčení.

Vliv na transport vztlínající vlhkosti mají také odpařování a rozpuštěné minerály, proto je skutečná výška vztlínání menší.

### 3.1.3 Kondenzace

Kondenzace vzniká, když vzduch není schopen pohltit veškerý objem vodních par za dané teploty, neboť schopnost pojmout vodní páry klesá se snižující se teplotou. Tento jev probíhá mimo atmosféru a povrch ploch i uvnitř zdiva a to ve velkých pórech, dutinách, mezerách apod.. Kondenzaci lze rozdělit na dva druhy kapilární a povrchovou.

Podmínky uvnitř kapilár se řídí dle Thompsonova jevu, kdy nad zakřivenou plochou je tlak vodních menší, čím větší je křivost hladiny. Velmi důležitým parametrem u kapilární kondenzace je velikost a poloměr pórů. Ke kondenzaci vody v nejjemnějších kapilárách dochází i po dosažení nasyceného tlaku. To lze vyjádřit pomocí Kelvinovy rovnice [3]:

$$\frac{P}{P_0} = - \frac{\sigma}{R \cdot T \cdot \rho \cdot r} \quad (2)$$

kde je

$\frac{P}{P_0}$  relativní vlhkost vodní páry vyjádřena jako poměr tlaků

$\sigma$  povrchové napětí kapaliny [N/m]

$R$  plynová konstanta [J/kg. m<sup>3</sup>]

$r$  poloměr kapiláry [m]

$\rho$  měrná hmotnost kapaliny [kg/m<sup>3</sup>]

$T$  absolutní teplota [K]

Ze vztahů Kelvinovy rovnice vyplývá, že vlhkosti stejných látek se mohou lišit v závislosti na poloměrech pórů, i když budou vystaveny stejným teplotním a vlhkostním podmínkám. V pórech s větším poloměrem bude docházet ke kapilární kondenzaci již za nižší vlhkosti vzduchu oproti pórům s menším poloměrem.

Kapilární kondenzace je výrazným činitelem při získávání vody, jejíž význam je například u rovnovážné vlhkosti stavebních hmot.

Užití velmi hutných jemných materiálů vede k povrchové kondenzaci, kde nerozhoduje zvýšení teploty interiéru.

Povrchová kondenzace vzniká tehdy, když dojde k poklesu teploty nebo zvýšení tlaku nasycené vodní páry. V takovém případě kondenzuje na povrchu nejbližší pevné fáze nadbytečná vodní pára obsažena v ovzduší ve formě rosy, mlhy apod.

### 3.1.4 Sorpce

Sorpce je jev, kdy dochází přejímání vodní páry z vnějšího prostředí do dosažení rovnovážného stavu, který je ovlivněn teplotou prostředí a parciálním tlakem vodní páry. V případě vyššího parciálního tlaku vodních par v materiálu oproti parám obsažených v ovzduší, dochází k jevu opačnému, kdy jsou tyto páry pohlcovány vnějším ovzduším, pak je tento proces nazýván desorpcí.

U těchto jevů dochází ke koncentraci molekul vody na povrchu materiálu, které tvoří souvislý vodní film. Hmotnost této vody je 1-2% celkové hmotnosti materiálu, v závislosti na specifickém povrchu kapilár a pórů. Rovnovážnou vlhkost materiálu za určité teploty a vnější vlhkosti znázorňují tzv. sorpční izotermy. Část vlhkosti, při transportu vždy zůstává ve zdivu.[3]

### 3.1.5 Vysychání

Jedním z rozhodujících vlivů na transportu vlhkosti. V první řadě při vysychání konstrukce dochází, samovolnému vypařování vlhkosti do ovzduší, kdy po čase vypařovací zóna postoupí hlouběji do konstrukce, kde k volnému vypařování již nedochází a voda se dostává k povrchu konstrukce difúzí a zde dochází k odpařování.

Vysychání je závislé na teplotě na parciálním tlaku vodních par a rychlosti proudění, teplotě a vlhkosti vzduchu. Vhodné prostředí je se suchým proudícím vzduchem a vyšší

teplotou. Doba vysychání lze určit u zdiva bez omítky např. dle Cadierguesova vzorce[3]:

$$t = S \cdot d^2 \quad [\text{dny}] \quad (3)$$

kde je

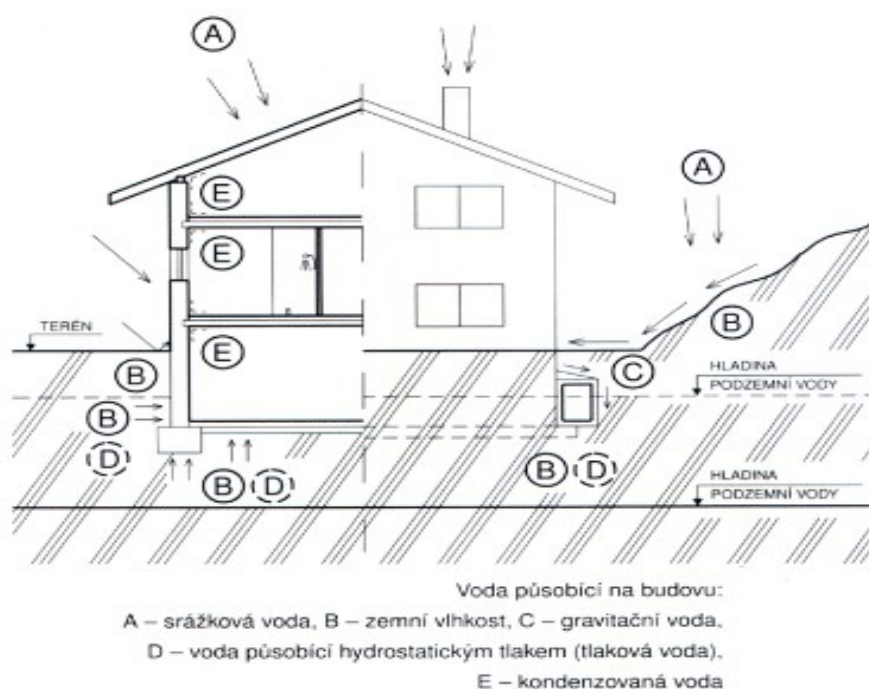
d tloušťka zdiva [cm]

S faktor závisující na druhu stavebního materiálu [ $\text{cm}^2 \cdot \text{dny}^{-1}$ ]

Pokud má konstrukce více vrstev, má na vysychání vliv jejich poloha a vlastnosti každé vrstvy. Vrstvy s vysokým difúzním odporem by měly být obecně umístěny tak, aby mohlo docházet k transportu vodních par na povrch a jejich samovolnému vypařování.

Ošetření hydrofobizačními prostředky brání vysychání a způsobuje hromadění vody v konstrukci nebo transport vlhkosti do vyšších míst zasažené konstrukce.

### 3.2 Zdroje vlhkosti v konstrukcích



Obr. č. 5 : Příčiny vlhnutí zdiva [19]

### **Voda srážková**

- Hnaná větrem

Ze strany působícího větru dochází k pronikání vody do konstrukce. Díky větru má voda dostatečnou sílu se dostávat do hlubších vrstev. Trhliny nebo nechráněné zdivo omítkou usnadňuje přístup vody do konstrukce.

- Odstříkující

Poruchy konstrukcí způsobené odstříkující vodou jsou především v soklových částech konstrukce, kde dochází k největšímu namáhání a následnému smáčení zdiva odstříkující vodou od vodorovného povrchu a působením sněhu. Odstříkující voda může obsahovat stopy solí, které jsou následně přenášeny dále do zdiva.

- Pronikající komínovými průduchy

Nechráněný průduch proti dešti, umožňuje vodě se dostat vnitřní část průduchu a další kumulaci na dně komínu, odkud se dostává dále do zdiva.

### **Voda vztlínající**

Zemní vlhkost prostupuje do zdiva díky kapilárním a sorpčním silám hornin. U objektu s absentující či vadnou vodorovnou nebo svislou izolací, dochází k pronikání podzemní vody kapilárním vztlínáním. Vztlínající voda tvoří mapy a výška zavlhčení konstrukce je kolem 1,5 m nad terénem, což je ovlivněno mimo jiné také větráním. Dotaci vody do konstrukce zajišťuje i difúze vodní páry z podzákladí do zdiva, která je dále transportována kapilárními silami. Intenzita vztlínající vody je přímo úměrná množství vody, které je v kontaktu s konstrukcí. Rozhodujícími faktory je propustnost zeminy a vydatnost zdroje vody. Spolu s vodou z podzákladí se mohou dostávat do konstrukce rozpustné minerály.

### **Voda kondenzovaná**

Ke kondenzaci vodní páry dochází v chladných místech konstrukce, kde teplota je nižší než rosný bod vodní páry v ovzduší. Kondenzace se projevuje zejména na povrchu.



### **Voda působící hydrostatickým tlakem**

Tato voda se vyskytuje zejména v období tání sněhů a přívalových dešťů, kdy se dostává voda do zdiva pod tlakem, což je způsobeno gravitačním působením. Jedná se o vodu gravitační a infiltrovanou, která je pod hladinou podzemní vody.

### **Vlhkost sorpční**

Obsahuje-li zdivo množství hygroskopických solí, přejímající vlhkost z okolního prostředí, dochází k mnohanásobnému zvýšení vlhkosti oproti konstrukce bez obsahu solí. Tento jev je ovlivněn teplotou a vlhkostí okolního prostředí.

### **Zabudovaná technologická vlhkost**

Každý objekt obsahuje určité množství vlhkosti, které se dostalo do konstrukce při realizaci díla. Odpařování vzniklé vlhkosti může trvat roky.

### **Další zdroje vlhkosti**

- vadné zdravotnické instalace
- nefunkční nebo vadný systém odvodu dešťových vod
- porušená střešní krytina

## **3.2.1 Důsledky působení vlhkosti na konstrukci**

Množství vlhkosti v konstrukci způsobuje degradaci malt, zdiva i omítkových vrstev. Vyvolané degradační procesy, mohou vést až k destrukci některých materiálů citlivých na působení vlhkosti, jako jsou například hliněné cihly. Vliv vlhkosti obecně působí negativně na mechanické vlastnosti zdiva.

Vlhkost v kombinaci s mrazem způsobuje zvyšování objemu vodních molekul v materiálech, které působí tlak na stěn pórů a kapilár, výsledné působení těchto jevů vede ke snižování pevnosti nebo celkové destrukci prvků.

Saturované póry a kapiláry zapříčiňují zvýšenou tepelnou vodivost a umožňující větší tepelné prostupy, působící objektům energetické ztráty.

Vlhkost na vnější straně konstrukce podporuje za určitých podmínek růst vegetace, která může přímo narušovat konstrukci nebo zajišťovat dotaci další vlhkosti. V interiéru zvýšená vlhkost podporuje tvorbu mikroorganismů na površích konstrukcí.

Spory plísní, se vyskytují ve větším množství i za pokojových teplot při vlhkosti větší než 70%. Výskyt plísní snižuje hygienické standardy a jejich vliv může negativně působit na lidský organismus.

Dlouhodobější absence vlhkosti ve zdivu a vysušování působí smršťovací procesy, které způsobují vznik trhlin a rozpad zdících materiálů a drolení pojiva.



*Obr. č. 6: Vztlínající vlhkost*



*Obr. č. 7: Působení biologických činitelů*



*Obr. č. 8: Vadný svod*



*Obr. č. 9: Výskyt solí ve zdivu [2]*

Vlhkost je nedílnou součástí prakticky všech pórovitých stavebních materiálů a z nich vytvářených konstrukcí. Určité množství vlhkosti v konstrukcích je z hlediska vnitřního mikroklimatu pozitivním jevem.

Voda kumulovaná v některých místech konstrukce, způsobuje degradační procesy i zhoršené užitné vlastnosti, čímž může zapříčinit horší funkčnost a spolehlivost celého objektu. Nejvíce namáhanou částí objektů bývá suterén, která je vystavena zemní vlhkosti. [3]

### 3.3 Příčiny poruch

Poruchy vyvolané vlhkostí se často snoubí s obsahem solí ve zdivu a mikrobiologických činitelů. Vnikání vody do konstrukce je buď permanentní nebo ojedinělé. Permanentní pronikání vody může být způsobeno vlastnostmi použitých materiálů, způsobem provozu objektu nebo vlivem volných vod.

Hydroizolace by měla zabraňovat vodě ve vnikání do konstrukce. V opačném případě se jedná o izolaci vadnou.

#### Vadný návrh

Elementární příčiny poruchy mohou být v návrhu izolace spodní stavby, pokud navržené řešení není dostačující posouzeným podmínkám pro založení staveb. I sanační návrh může být při opatření proti vlhkosti nevhodně zvolený z důvodů neznalosti účinnosti opatření nebo nevhodnosti provedení při daných podmínkách.

#### Vada nebo absence hydroizolace

U některých objektů a historických staveb jsou izolace nedostačující nebo zcela chybí. Hydroizolace historických objektů není vždy absentující a má mnohdy rozličné provedení. Častým opatřením jsou vzduchové kanálky, ale i provedení jílových vrstev, kamenných desek, ostře pálené keramiky a anglických dvorků. Některé z těchto izolací již nemusí splňovat schopnost zadržovat vodu a mnohdy mohou být i příčinnou dalších poruch.

### **Nekvalitní provedení**

Ani při dobrém návrhu izolace spodní stavby není záruka účinnosti, pokud provedení není kvalitní. Mnohdy je kvalita provedení špatná i u novostaveb. Při izolování spodní stavby se často podceňují detaily vodorovných a svislých styků izolací, nekvalitně se provádí ukončení izolace, spojení jednotlivých izolačních pásů. Zanedbává se i vliv klimatických podmínek, které mohou mít na prováděné práce velký vliv.

### **Změna podmínek stavby**

I přes provedení vhodně navržených izolací mohou vznikat poruchy, zapříčiněné změnou podmínek, které byly posuzovány v původním návrhu.

V případě vnějších negativních vlivů na izolaci stavby jsou nejčastějším případem jiné hydrogeologické vlastnosti okolního terénu a podzákladí budovy, způsobené nevhodným situováním a založením nové stavby v okolí, nevhodným provedením povrchu v blízkosti současné stavby i dynamickými účinky. Neopomenutelným vlivem může být i změny úrovně spodních vod.

Vnitřní negativní jevy mohou být projevy statiky konstrukcí, změn v provozu či tepelně technických podmínek konstrukce.[3]

## **3.4 Vliv solí v konstrukcích**

Soli jsou binární nebo vícesložkové sloučeniny jednoduchých nebo složitých kationtů. Jen určitá část solí představuje reálné rizika ve stavební praxi a při provádění sanačních opatření historických a pátkových objektů.

Soli jsou součástí migrace vod a podílejí se velkou měrou na poškozování povrchu stavebních materiálů. Vody s obsahem solí mohou proniknout i do porézních stavebních prvků. Lokální nebo zónová kumulace solí, může vést k destrukci v daných místech. Důležitou vlastností je rozpustnost solí. Korozi zapříčiňují ve vodě dobře rozpustné soli, vlivy nerozpustných jsou zanedbatelné. Nejčastějšími korozními činiteli jsou sírany, chloridy, dusičnany, výjimečně i uhličitany a dusitany. [10]

Mezi zdroje solí řadíme [3]:

- primárně obsažené v použitých materiálech
- transportované vztlínající vlhkostí okolního terénu nebo pronikáním z jiných částí budovy
- vzniklé chemickou korozí použitých materiálů vlivem ovzduším
- vzniklé z biologických zdrojů
- vzniklé v důsledku sanačních opatření

### 3.4.1 Destruktivní vlivy solí

Mezi základní procesy se řadí krystalizace a hydratace solí v pórovitých stavebních materiálech. Jedná se o procesy, které potřebují k poškození hmot více cyklů a jejich destrukční vlivy jsou znatelné až po několika desítkách a více cyklech.

Krystalizace je proces, kdy koncentrované množství solí překročí mez rozpustnosti a nerozpuštěné krystaly soli zvětšují svůj objem. Krystalický tlak působící na stěny pórů nebo trhlin vyvolaný změnou objemu, může způsobovat destruktivní jevy na daných materiálech. Velikost síly tlaku je ovlivněna mírou přesycení a teplotou. Schopnost krystalizace závisí také na druhu pórovitosti, kde zpravidla platí, že materiály s větší podílem velkých pórů jsou odolnější, než-li jemně pórovité materiály.

Druhým destruktivním procesem je hydratace solí, což je proces při kterém určité druhy solí vážou vodu a utvářejí tzv. hydráty. Při tvorbě hydratovaných forem dochází k zisku nebo ztrátě vodních molekul, což vyvolává velké objemové změny a vyvolává hydrostatické tlaky. Přechody těchto forem jsou ovlivněny svou stabilitou v daných klimatických podmínkách, teplotou a vzdušnou vlhkostí. Nejnebezpečnějšími druhy solí, jsou ty, které jsou schopny hydratovat za běžných teplot. Mezi zástupce takových solí se řadí síran sodný, uhličitán sodný nebo uhličitán vápenatý.[10]

Soli mají také mimo jiné schopnost hygroskopické nasákavosti, která jim umožňuje přijímat vodu ze vzduchu a zadržet ji v kapalně formě. Tato schopnost se u různých solí liší.

### **3.4.2 Důsledky působení solí**

Důsledky lze rozdělit dle jejich projevu na projevy povrchové a vnitřní. Typické pro povrchové projevy jsou výkvěty solí tzv. eflorescence. Výkvěty a výluhy jsou tuhé soli, transportované na povrch vodou, kdy výluhy bývají pevně spojeny s podkladem a krystalické výkvěty jsou lehce odstranitelné. Povrchové projevy obecně nejsou přímým destruktivním činitelem, ale kazí estetický vzhled a slouží jako indikátor výskytu solí. Chemické složení výkvětů je stejné jako složení solí obsažené v materiálech a vzhledově se různí. Povrchové procesy se vyskytují často s podpovrchovými, které krystalizují v pórech, dutinách a trhlinách a mnohem více se podílejí na destruktivních pochodech.

Velký podíl na zavlhčení zdiva má hygroskopická vlastnost solí a značně ztěžuje odstranění vlhkosti. [10]

## 4. Experimentální část – sledování změn fyzikálně mechanických vlastností stavebních materiálů vlivem vlhkosti

### 4.1 Cíle experimentální části

Experimentální část byla rozdělena na dvě části. První část je zaměřena na měření IN SITU a zkoumá zjištěné hodnoty měření pevnosti v tlaku a vlhkosti cihelných prvků ve vybraných částech vily rodiny Löw-Beer v Brně. Druhá část je laboratorní a zabývá se analýzou vlastností cihelných prvků nalezených v objektu. Zároveň je cílem identifikovat vliv působení teploty a vlhkosti na dané prvky pomocí simulací možných vnějších podmínek. Výsledné vlastnosti byly porovnávány s referenčními vzorky běžných cihel s deklarovanými vlastnostmi viz tabulka (1).



Obr. č. 10: Löw-Beerova vila

Tabulka č. 1 : Deklarované vlastnosti referenčního vzorku [16]

| Typ cihly  | Rozměry [mm]   | Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ] | Pevnost v tlaku [MPa] | Výrobce                                   |
|------------|----------------|----------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------|
| Cihla plná | 290 x 140 x 65 | 1600                                   | 15                    | Zlínské cihelny s.r.o. - závod Malenovice |



Obr č. 11: Referenční vzorek z vrchu



Obr č. 12: Referenční vzorek z boku

## 4.2 Stručný popis a historie objektu

### Popis objektu

Löw-Beerova vila se nachází v Brně na ul. Drobného 297/22 p.č. 3326 k.ú. Černá pole. Čtyřpodlažní objekt se suterénem, dvěma obytnými nadzemními podlažními a půdním prostorem je nepravidelného půdorysu tvořeným kombinací příčných a podélných traktů. Masivní zděná stavba z plných pálených cihel je situována mezi obytnými domy a umístěná ve svažitém terénu. Objekt má po rekonstrukci započaté v roce 2013 sloužit jako muzeum.

### Historie

Nemovitost na Drobného 22 patřila od roku 1854 Antonínu Rüdigerovi Deyksovi, majiteli cihelny, jehož dědicové ji v roce 1888 prodali. V roce 1903 zakoupil realitu továrník Moritz Fuhrmann, který si zde dal postavit rodinnou vilu. Po Fuhrmanově smrti prodali v srpnu 1913 jeho synové vilu továrníkovi Alfrédu Löw-Beerovi. Za éry Löw-Beerů došlo zřejmě k obnově interiéru centrální haly. V roce 1940 zabavili Löw Beerovu vilu Němci pro sídlo gestapa. V Roce 1946 byla nad vilou ustavena národní správa a od roku 1954 se stala majetkem Československého státu. Od roku 1962 zde sídlí domov mládeže. ze stavebního hlediska se jedná o robustní zděnou budovu „klasicizující“ tektoniky. Z konstrukčního hlediska je dům velmi stabilní a robustní. Stavební zásahy v průběhu historie domu byly malé a proběhly v třicátých letech, aniž by dům nějak zásadně ovlivnily. Průčelí i většina interiérových prvků ve vile jsou doposud zachovány. Vila patří do Ústředního seznamu kulturních památek. [2]



## 4.3 Zkušební postupy

### 4.3.1 Měření vlhkosti

#### Gravimetrická metoda

Jedná se o velmi přesnou metodu, jejímž principem je zjištění obsažené vlhkosti rozdílem hmotnosti vlhkého a suchého vzorku. Pro použití metody je nutný odběr vzorků z místa měření. Vzorky byly umístěny do suchých a uzavřených nádob, tak aby nebyly v kontaktu s vnějším prostředím a nedocházelo k výměně vlhkosti. V případě jádrového vývrtu by měly být vzorky uchovány v místě vývrtu alespoň 24 hodin, kvůli vlivu teploty vzniklé třením korunky na vzorek. Při přepravě vzorků může dojít ke kondenzaci vody na stěnách nádoby a pro přesnější měření je vhodné vzorky zvážit i s nádobou, aby byla ve výsledku obsažena hmotnost dané vlhkosti. Pokud nehrozí ztráta chemicky vázané vody, suší se vzorky při teplotě 105 °C v opačném případě jsou teploty nižší. Obsah vlhkosti je dán vztahem dle normy ČSN EN ISO 12570:

$$w = \frac{m_w - m_o}{m_o} \quad [\%] \quad (5)$$

kde je

$m_w$  hmotnost zkušebního vzorku před vysušením [kg]

$m_o$  hmotnost zkušebního vzorku po vysušení [kg]

Nevýhodou této metody je časová náročnost a destruktivní odběr vzorků.

#### Odporová metoda

Je rychlá metoda určení vlhkosti u povrchu, jejíž princip závisí na rozdílu elektrické vodivosti materiálů o různých vlhkostech. Při vzrůstající vlhkosti se bude zvyšovat vodivost a tím pádem klesat elektrický odpor. Na měření mají vliv i jiné fyzikální a chemické vlastnosti materiálu. Každé zařízení je nutno kalibrovat dle stavebního materiálu a teploty. Příložné vlhkoměry jsou schopny měření pouze do malé hloubky pod povrchem a převážně se používají jen pro orientační stanovení vlhkosti.

### 4.3.2 Ověření pevnosti v tlaku metodou lokálního porušení

Zkouška se provádí Kučerovou vrtačkou a slouží k určení pevnosti tlaku zdících prvků i malty. Principem je pevnostní odpor vůči vrtání, výsledná hloubka je přepočtena na pevnost pomocí přepočítací tabulky. Zkouška je velmi oblíbená pro svou rychlost, bez výrazného zásahu do konstrukce a jednoduché vyhledání výsledků. Pro jednodušší provedení byla vyvinuta elektrická aku vrtačka PZZ 01 s vrtákem o průměru 6 mm. Vrtačka má nastavitelné stupně vrtání pro dané materiály, které se liší počtem otáček a přítlak je hlídán pružinkou.

Před započítím zkoušky ověření pevnosti cihel se očistí povrch zdiva až na cihelné zdivo, pro malty je nutné očistit maltové lože minimálně do 20 mm a zvolit si správný stupeň otáček. Zkušební místo by mělo být zvoleno s minimální vzdáleností 50 mm od styčné spáry a následně 40 mm od předchozí zkoušky. Poté se přiloží vrtačka kolmo ke zkoušenému vzorku a započne se s vrtáním s ohledem na hlídání přítlaku.

Hloubka navrtání se měří posuvným měřidlem a dle kalibračního vztahu se vypočte výsledná pevnost. Zkoušení místo je platné pouze pokud se neliší průměr tří hodnot o více než 30%. V takové případě se nevyhovující vrt vyloučí a provede se nový vrt.

### 4.3.3 Stanovení skutečných rozměrů

Před započítím měření je nutno očistit hrany a plochy od veškerých větších výčnělků. Pomocí měřidla se zjistí rozměry délky, šířky a tloušťky. Měření se provádí na spojnicí středů protilehlých stran. Pro všechny rozměry se provádí tři měření a výsledkem je jejich aritmetický průměr. Výsledek se zapisuje s přesností na 1 mm.

Výsledné zatřídění se provede na základě odchylek od referenčních rozměrů v mm dle normy ČSN EN 771-1.

### 4.3.4 Stanovení objemové hmotnosti

Objemová hmotnost pravidelných těles se zajišťuje váhovou metodou, kde se hmotnost vzorku určuje v suchém stavu gravimetrickou metodou.

Objem vzorků se vypočte na základě průměrných hodnot vnějších rozměrů, kde základem je alespoň deset kusů vzorků. Výsledek je dán podílem vysušeného vzorku  $m_s$  a průměrného objemu  $V$ . Výsledné zatřídění se provádí dle normy ČSN EN 771-1. Rovnice výpočtu objemové hmotnosti:

$$\rho = \frac{m_s}{V} \quad [\text{kg.m}^{-3}] \quad (4)$$

### 4.3.5 Nasákavost cihelných prvků

Nasákavost nám udává schopnost materiálu přijímat vodu. Stanoví se jako procentuální poměr množství vody obsažené ve vzorku a vysušeného vzorku.

Nasákavost se zjišťuje na vysušených vzorcích při teplotě 105 °C, které se uloží do nádoby s čistou nebo destilovanou vodou tak, aby nedocházelo ke styku jednotlivých vzorků mezi sebou ani stěnou nádoby. Hladina vody v nádobě by měla být alespoň 50 mm nad povrchem vzorků. Voda se uvede do varu během jedné hodiny a udržuje se při teplotě varu další čtyři hodiny. Po ukončení varu se nechají vychladnout na okolní teplotu po dobu 16 až 24 hodin. Následně se vzorky vyjmou a tkaninou se odstraní povrchová voda. Zvážení by mělo proběhnout do 5 minut od vyjmutí vzorků z nádoby.

Nasákavost jednotlivých vzorků byla vypočtena ze vztahu:

$$NV = \frac{m_n - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (6)$$

kde je

$m_n$  hmotnost saturovaného vzorku [kg]

$m_s$  hmotnost vysušeného vzorku [kg]

#### 4.3.6 Zkouška pevnosti v tlaku

Pro posuzování mechanických vlastností cihelných vzorků, se vzorky vystavují zkoušce pevnosti v tlaku. Zkoušky se většinou provádí na na zdících prvcích upravených broušením o rozměrech 50 x 50 x 50 mm. Zatěžování těchto prvků by mělo probíhat rovnoměrnou rychlostí, až po dosažení síly, jenž je rovna jedné polovině z hodnoty zatížení při porušení.

Před provedením zkoušky se vzorky napřed očistí a přeměří. Následně se vloží do tlakového lisu s ohledem na tvarové nepřesnosti a jejich vlivy. Rozměrové hodnoty se zadají do počítače a krychličky se zatíží konstantně zvyšující se rychlostí zvolenou s ohledem na předpokládanou pevnost až do porušení vzorku. Pevnost v tlaku se vypočte vztahem (7), kdy pevnost porušení  $F$ , je znázorněna počítačem.

$$R = \frac{F}{A_z} \cdot 1000 \text{ [MPa]} \quad (7)$$

kde je

$F$  maximální zatěžovací síla [KN]

$A_z$  plocha zatěžování [mm<sup>2</sup>]

Výsledná pevnost by měla být zaokrouhlena na 0,1 N/mm<sup>2</sup>.

## 5. Vyhodnocení experimentální části

### 5.1 Výsledky měření IN SITU

V experimentální části, byly provedeny měření na objektu vily Löw-Beer. Cílem těchto měření bylo zjistit vlhkost cihelných prvků pomocí odporového vlhkoměru i sekaných sond, které sloužily jako zdroje dat pro gravimetrickou metodu. Dále bylo prováděno i zjištění pevnosti cihel pomocí Kučerovy vrtačky. Měření bylo provedeno na 14 předem vytipovaných místech (V1 – V14) především ve sklepních částech. Sekané sondy byly provedeny pouze na 10 místech. Současně s měřením cihelných prvků bylo provedeno i měření pevnosti maltových spár, které není součástí této práce.

Měření bylo prováděno na vytipovaných místech dle předchozího stavebně technického průzkumu, kde bylo následně vybráno šest cihelných vzorků ve výšce 108 – 145 cm, na kterých bylo prováděno měření.

#### 5.1.1 Výsledky měření vlhkosti

Měřením vlhkosti bylo ověřovány hodnoty saturace zdiva dvěma výše uvedenými metodami. Výsledné hodnoty vlhkosti získané měřením byly stanoveny pro vytipovaná odběrná místa. Hodnoty naměřené odporovým vlhkoměrem byly porovnány s přesnější gravimetrickou metodou. Výsledné hodnocení vlhkosti zdiva bylo prováděno dle normy ČSN P 73 0610 (tabulka č.2).

**Tabulka č. 2 : Klasifikace vlhkosti zdiva [8]**

| Vlhkost [%]       | Klasifikace vlhkosti |
|-------------------|----------------------|
| $w < 3$           | Vlhkost velmi nízká  |
| $3 \leq w < 5$    | Vlhkost nízká        |
| $5 \leq w < 7,5$  | Vlhkost zvýšená      |
| $7,5 \leq w < 10$ | Vlhkost vysoká       |
| $10 \leq w$       | Vlhkost velmi vysoká |

### Gravimetrická metoda

Při zkoušce měření vlhkosti bylo postupováno dle normových postupů. V objektu Löw-beerovy vily byly provedeny na 10 ze 14 vytipovaných míst sekané sondy a odebrány vzorky cihelného zdiva, které byly hermeticky uzavřeny v označených nádobách. Sondy byly prováděny kladivem a ručním sekáčem. Sušení vzorků proběhlo 24 hodin při teplotě 105 °C. Po zvážení byla odečtena od hmotnosti hmotnost přepravované nádoby. Místa odběru byla shodná s místy měření odporovým vlhkoměrem.



Obr. č. 13: Sušení vzorků



Obr. č. 14: Vážení vysušených vzorků

### Metoda měření vlhkosti odporovým vlhkoměrem

Pro měření vlhkosti bylo použito elektrické odporové zařízení WHT – 650. Vzhledem k absenci kalibračních hodnot pro cihelné zdivo byly dané hodnoty vyvozeny na základě hodnot vypočtených gravimetrickou metodou. Pro kalibraci vytvořen kalibrační vztah (9), vytvořený ze závislosti naměřených hodnot odporovým vlhkoměrem a gravimetrickou metodou.

Před započítáním měření byl povrch řádně očištěn od všech nečistot a následně byly hroty vlhkoměru zatlačeny co nejhlouběji do cihelného zdiva. Místa měření byly shodná se místy provedení sekaných sond. Každý z vybraných šesti cihelných prvků cihelného zdiva byl změřen třikrát a ze všech naměřených hodnot byl vybrán celkový průměr pro dané odběrné místo. Z naměřených hodnot byly vyřazeny ty hodnoty, lišící od průměru měření o více než 30 %.

Výpočet kalibračního koeficientu:

$$c = \frac{w_g}{\Delta R_c} \quad [-] \quad (8)$$

kde je

$w_g$  vlhkost vypočtena na základě gravimetrické metody pro danou cihlu [%]

$\Delta R_c$  průměr hodnot naměřených odporovým vlhkoměrem na dané cihle [%]

Výsledný kalibrační vztah:

$$w_o = \Delta R_o \cdot c \quad [\%] \quad (9)$$

kde je

$\Delta R_o$  průměr hodnot naměřených odporovým vlhkoměrem v daném místě [%]



*Obr. č. 13: Měření odporovým vlhkoměrem*

### **Tabulka č. 3 : Výsledné hodnoty vlhkosti**

| Odběrné místo | Vlhkost [%]<br>(gravimetricky) | Vlhkost [%]<br>(vlhkoměrem)<br>$\phi$ z 18 měření | Odchylka hodnot<br>vlhkoměru [%] |
|---------------|--------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------|
| V1            | -                              | 2,7                                               | -                                |
| V2            | 0,7                            | 1,3                                               | 85,7                             |
| V3            | -                              | 1,3                                               | -                                |
| V4            | 0,8                            | 0,9                                               | 12,5                             |
| V5            | -                              | 0,6                                               | -                                |
| V6            | 1,6                            | 1,4                                               | 12,5                             |
| V7            | 2,0                            | 1,2                                               | 60,0                             |
| V8            | 1,6                            | 1,1                                               | 68,8                             |
| V9            | -                              | 1,5                                               | -                                |
| V10           | 0,5                            | 0,8                                               | 60,0                             |
| V11           | 0,6                            | 0,7                                               | 16,7                             |
| V12           | 0,5                            | 0,8                                               | 60,0                             |
| V13           | 1,0                            | 0,9                                               | 10,0                             |
| V14           | 0,7                            | 0,7                                               | 0,0                              |
| <b>Průměr</b> | <b>1,0</b>                     | <b>1,1</b>                                        | <b>38,6</b>                      |

### Vyhodnocení

Výsledné hodnoty vlhkosti gravimetrickou metodou byly v rozmezí 0,5 – 2 % a průměrná vlhkost zdiva stanovena touto metodou je 1%. Průměrná vlhkost konstrukce ve spodní části (V1-V10) nabyla hodnoty 1,2 %. Hodnoty odporovým vlhkoměrem byly v intervalu 0,6 – 2,7 % a lišili se v průměru 38,6 %. Žádná z hodnot naměřena gravimetrickou metodou nepřesáhla 3 %, což klasifikuje všechny odběrná místa jako velmi suchá. Výsledná vlhkost se vzhledem k hloubce ručně sekaných sond bude lišit od hodnot hlouběji v konstrukci.



### 5.1.2 Pevnost v tlaku lokálním porušením

V odběrných místech bylo vybráno vždy šest cihelných prvků, na každém prvků byly provedeny tři vrty aku vrtačkou PZZ01. Výsledná pevnost v daném místě je průměrem vypočítaných pevností na všech prvcích dle převodní tabulky se započítanou směrodatnou odchylkou (11). Výsledná pevnost byla vypočtena dle vztahu (12).

$$R_m = \frac{\sum_{i=1}^n R_{m,i}}{n} \quad (10)$$

$$S_{r,i} = \frac{1}{n-1} * \sqrt{\sum (R_{m,i} - R_m)^2} \quad (11)$$

$$R_{Cl} = R_m - t_n \cdot S_r \quad (12)$$

$R_m$  výběrový průměr vyšetřované pevnosti zjištěný z „n“ zkušebních těles

$S_r$  výběrová směrodatná odchylka

$t_n$  součinitel pro odhad dolní hranice konfidenčního intervalu průměru

$R_{cl}$  výsledná pevnost pro dané místo



Obr. č. 14: PZZ01



Obr. č. 15: Měření hloubky vrtu

Tabulka č. 4 : Výsledná pevnost zkoušky ze zkoušky Kučerovou vrtačkou

| Odběrné místo | Pevnost [MPa] |
|---------------|---------------|
| V1            | 12,4          |
| V2            | 13,6          |
| V3            | 12,0          |
| V4            | 10,8          |
| V5            | 10,8          |
| V6            | 10,6          |
| V7            | 10,3          |
| V8            | 10,5          |
| V9            | 10,8          |
| V10           | 10,4          |
| V11           | 11,7          |
| V12           | 10,6          |
| V13           | 10,2          |
| V14           | 10,3          |
| <b>Průměr</b> | <b>11,1</b>   |

### Vyhodnocení

Na základě provedení zkoušky pevnosti v tlaku lokálním porušením byly v jednotlivých odběrných místech stanoveny průměrné pevnosti, které se pohybovaly v rozmezí 10,2 – 13,6 MPa. Průměrná pevnost v tlaku ve všech odběrných místech byla 11,1 MPa.

## 5.2 Výsledky laboratorní měření

Pro laboratorní zkoušky bylo použito celkem 22 vzorků cihel. Na stavbě bylo odebráno 19 cihel a pro porovnání vlastností byly vybrány 3 současné cihelné prvky. Všechny vzorky byly roztrženy dle výrobního označení a vzhledu do typologických skupin: A, B, C, D, E, F, R, kde cihly typu R jsou zástupci referenčních vzorků. Každá cihla byla označena daným písmenem a pořadovým číslem pomocí číselného indexu, dle počtu cihel v daných skupinách. Následně byly cihly rozřezány na krychličky o rozměrech 50 x 50 x 50 mm

a rozděleny do sérií (1-8), které byly podrobeny dalším zkouškám.

### 5.2.1. Určení základních vlastností

Pro nedostatek vzorků a rozsáhlejší deformace u méně četných prvků byly stanoveny pouze průměrné hodnoty pro dané typy cihel. Rozměry byly stanoveny jako průměr všech délkových, šířkových a výškových hodnot daných typů cihel. Kde pro každý rozměr bylo provedeno devět měření, tři měření na každém kraji a ve středu. Objemová hmotnost byla vypočtena dle normového vztahu (4).

**Tabulka č. 5 : Základní vlastnosti nalezených vzorků dle typologie**

| Typologické označení | Rozměry [mm]   | Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ] | Počet kusů [ks] |
|----------------------|----------------|----------------------------------------|-----------------|
| TYP A                | 286 x 143 x 67 | 1600                                   | 3               |
| TYP B                | 298 x 144 x 67 | 1590                                   | 4               |
| TYP C                | 296 x 147 x 67 | 1590                                   | 4               |
| TYP D                | 300 x 148 x 67 | 1500                                   | 5               |
| TYP E                | 287 x 140 x 69 | 1700                                   | 1               |
| TYP F                | 298 x 146 x 69 | 1340                                   | 2               |



*Obr. č. 16: Vzorek typ A*



*Obr. č. 17: Vzorek typ B*

*Obr. č. 18: Vzorek typ C**Obr. č. 19: Vzorek typ D**Obr. č. 20: Vzorek typ E**Obr. č. 21: Vzorek typ F*

### 5.2.2 Nasákavost

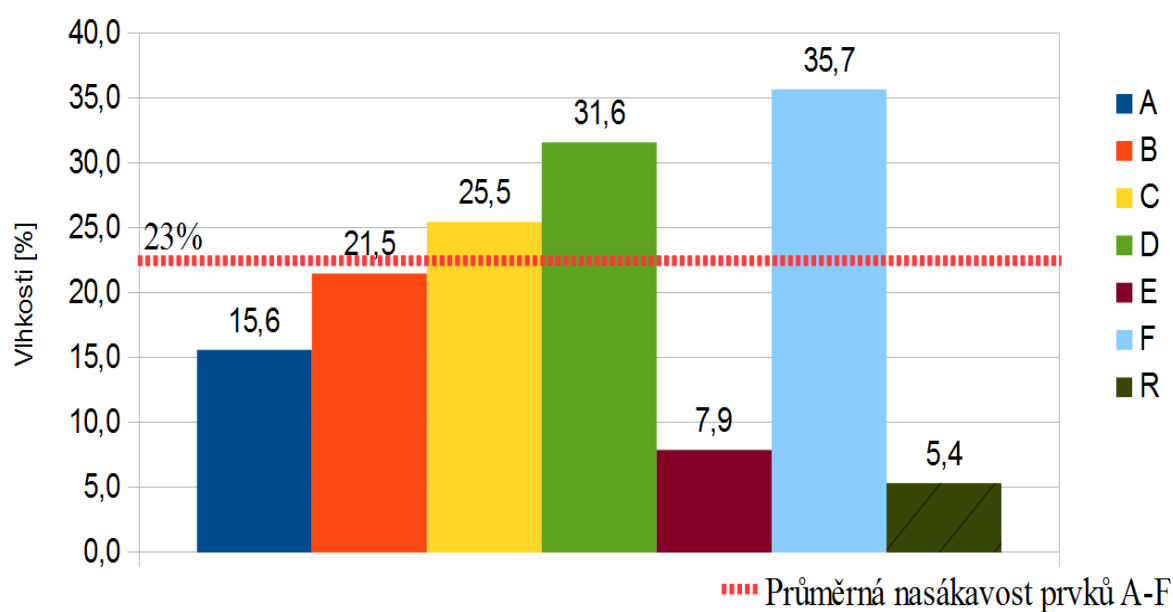
Pro zkoušku nasákavosti byla vybrána série vysušených vzorků. Během hodiny byla voda s patřičně umístěnými vzorky uvedena do varu. Odpařená voda byla pravidelně doplňována. Po 4 hodin varu se nádoba se vzorky nechala odstát cca 20 hodin, aby došlo k ustálení teploty v nádobě na teplotu okolního prostředí. Po vychladnutí byly vzorky postupně povrchově osušeny a zváženy.

*Obr. č. 22: Var při zkoušce nasákavosti**Obr. č. 23: Vychladlé vzorky*

Tabulka č. 7 : Výsledné hodnoty nasákavosti

| Označení vzorku | NV [%] | Průměrná [%] | Označení vzorku | NV [%] | Průměrná [%] |
|-----------------|--------|--------------|-----------------|--------|--------------|
| A1/8            | 24,5   | 15,6         | D1/8            | 27,7   | 31,6         |
| A2/8            | 14,3   |              | D2/8            | 33,4   |              |
| A3/8            | 21,6   |              | D3/8            | 28,0   |              |
| B1/8            | 20,4   | 21,5         | D4/8            | 28,6   |              |
| B2/8            | 24,1   |              | D5/8            | 21,6   | 7,9          |
| B3/8            | 18,1   |              | E1/8            | 16,4   |              |
| B4/8            | 20,9   |              | F1/8            | 26,2   | 35,7         |
| C1/8            | 18,7   | 25,5         | F2/8            | 27,2   |              |
| C2/8            | 22,5   |              | R1/8            | 14,2   | 5,4          |
| C3/8            | 19,1   |              | R2/8            | 14,3   |              |
| C4/8            | 19,4   |              | R3/8            | 14,3   |              |

Průměrná nasákavost



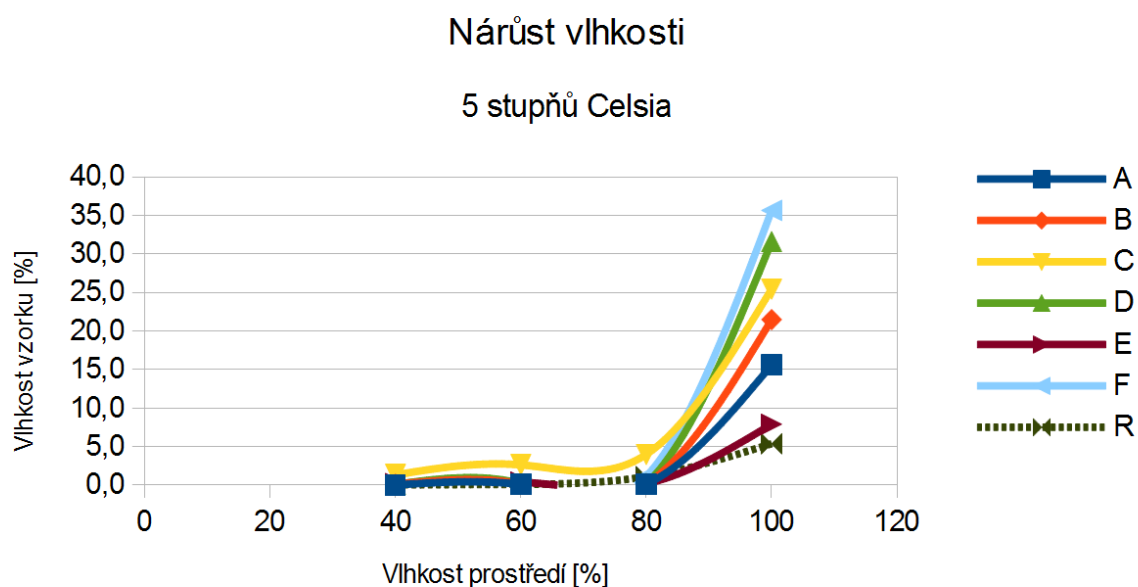
Obr. č. 24: Průměrná nasákavost jednotlivých skupin vzorků

## Vyhodnocení

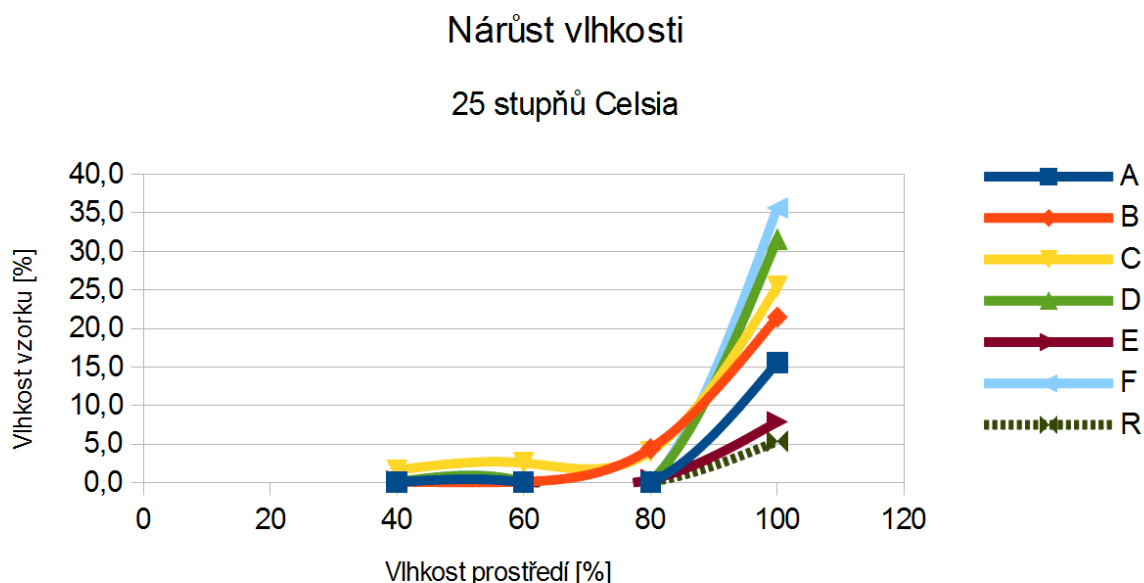
Výsledné hodnoty nasákavosti jednotlivých vzorků byly v rozmezí 14,2 – 33,4 procent. Průměrnou hodnotou nasákavosti odebraných vzorků z vily je 23 %. Průměrné hodnoty jednotlivých skupin prvků se výrazně od sebe odlišují. Schopnost nasákavosti byla u ostře pálených cihel typu E a R mnohem nižší než u ostatních.

### 5.2.3 Nárůst vlhkosti

Vysušené vzorky byly ukládány do klimatické komory vždy po třech sériích při dané teplotě. Jednotlivé krychličky byly umístěny tak, aby nedocházelo ke styku mezi sebou ani stěnami klimatické komory. Teplota a vlhkost byly nastaveny v klimatické komoře na odpovídající podmínky pro stavební praxi. Vzorky byly vystaveny působení vlhkosti 40, 60 a 80 procent, za teplot 5 a 25 °C, kdy se vlhkost za dané teploty každé tři dny postupně zvyšovala. Po skončení cyklu se zkouška opakovala za jiné teploty. Po uplynutí intervalu 3 dnů byla vždy jedna série vzorků zvážena a byl stanoven obsah vlhkosti pro jednotlivé vzorky. Stanovení vlhkosti daných vzorků bylo provedeno dle výše uvedeného vztahu (5). Hodnoty nasákavosti při 100% vlhkosti byly brány z průměrných hodnot nasákavosti pro dané skupiny, přičemž vliv teploty byl zanedbán.



Obr. č. 25: Nárůst vlhkosti při 5 °C



Obr. č. 26: Nárůst vlhkosti při 25 °C

### Vyhodnocení

Zkouška prokázala, že vliv teploty na nárůst vlhkosti vlivem okolního prostředí je zanedbatelný. Příjem vlhkosti obsažené ve vzduchu byl v daném časovém intervalu relativně malý oproti množství vlhkosti přijaté při zkoušce nasákavosti i za vysokých vlhkostí. Malá absorpce vzdušné vlhkosti mohla být způsobena krátkodobým umístěním v daných podmínkách, nedostatečným očištěním vzorků od prachových částic nebo způsobem cirkulace vzduchu v klimatické komoře vzhledem k umístění vzorků.

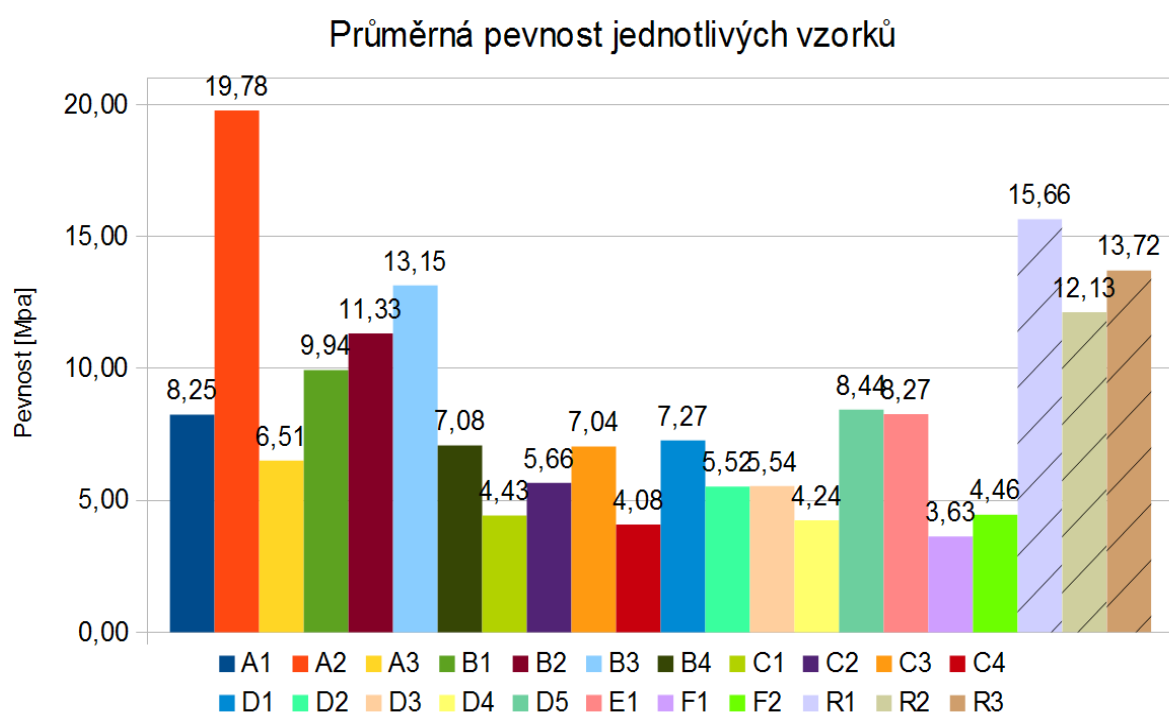
### 5.2.4 Pevnost v tlaku

Pro určení referenčních pevností za laboratorních podmínek byla podrobena jedna série vzorků zkoušce pevnosti v tlaku. Nejprve byly zjištěny hodnoty pevností jednotlivých vzorků a následně byla stanovena průměrná pevnost pro jednotlivé skupiny dle typologického zařazení. Na základě průměrných pevností jednotlivých vzorků byly stanovy průměrné pevnosti pro typologicky rozřazené skupiny vzorků a na základě průměru pevností vzorků pocházejících ze zkoumaného objektu, byla stanovena průměrná pevnost. Při měření tlaku se postupovalo dle výše popsanych postupů. K omezení působení tvarových deformací způsobených řezáním bylo využito pryžových podložek.





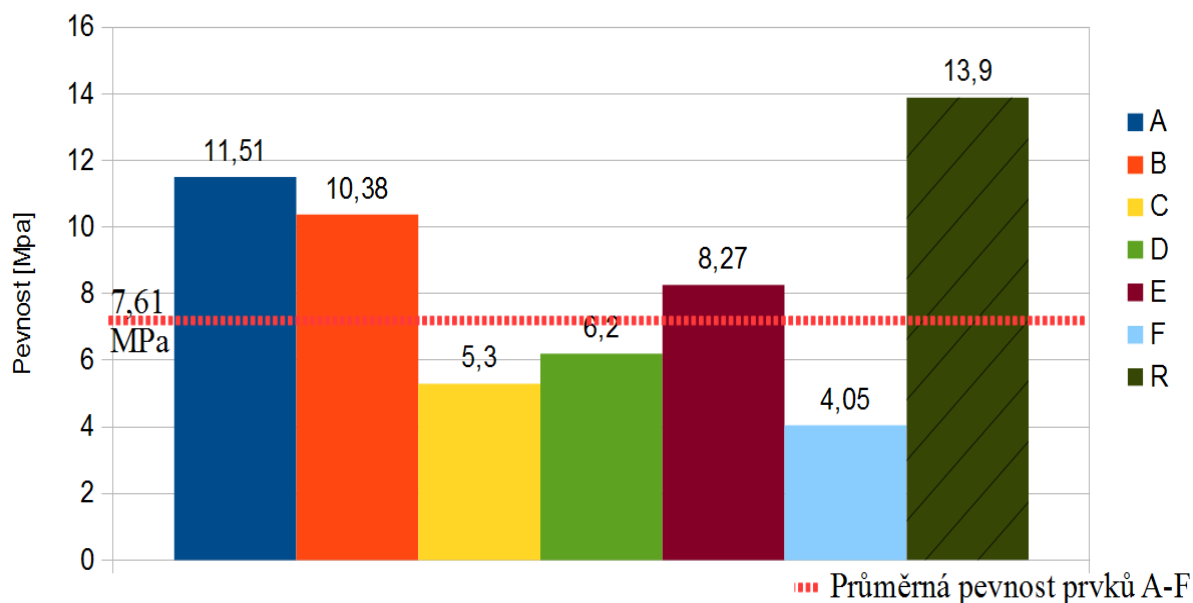
Obr. č. 27: Měření pevnosti v tlaku



Obr. č. 28: Průměrné pevnosti jednotlivých vzorků



## Průměrná pevnost cihelných prvků



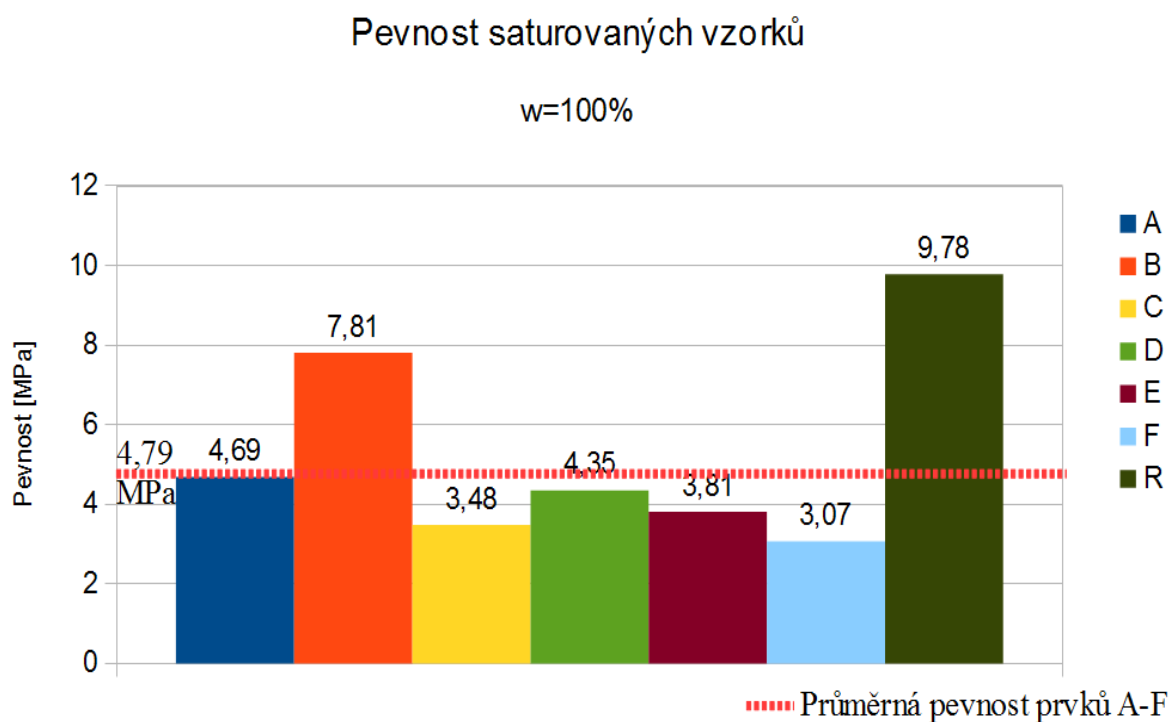
Obr. č. 29: Průměrná pevnost jednotlivých skupin vzorků

### Vyhodnocení

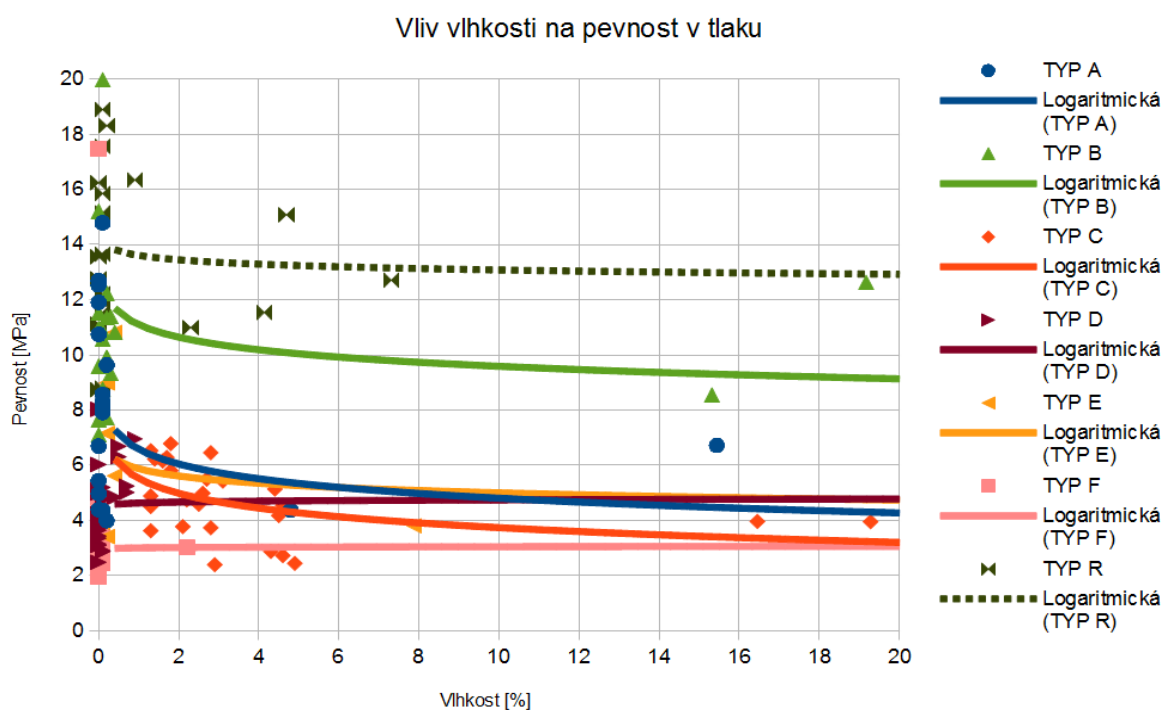
Referenční hodnoty se u některých skupin prvků odlišují, výsledné odchylky mohou být způsobeny rozdílností teploty výpalu a nepřesnostmi vzniklé při řezání vzorků. Průměrné pevnosti všech skupin analyzovaných vzorků byly v rozmezí 3,63 – 19,78 MPa. Průměrná pevnost pro prvky odebrané z Löw-Beerovy vily byla 7,61 MPa. Zkoušky proběhly za laboratorních podmínek. Referenční vzorky nedosáhly deklarovaných hodnot pevnosti.

### 5.2.5 Vliv vlhkosti na pevnost v tlaku

K určení vztahu byly všechny série vzorků, sledované pro obsah vlhkosti, ihned po zvážení zkoušeny na pevnost v tlaku. Po zvážení byly vzorky uchovány tak, aby byla omezena výměna vlhkosti mezi vzorky a vnějším prostředím. Výsledné hodnoty pevnosti byly přiřazeny k obsahu vlhkosti pro daný vzorek a vloženy do grafu. Výslednými hodnotami byla proložena křivka znázorňující tendenční vztah pro danou skupinu vzorků.



Obr. č. 30: Pevnost saturovaných vzorků



Obr. č. 31: Graf závislosti pevnosti v tlaku na vlhkosti

**Vyhodnocení**

Průměrná pevnost v tlaku saturovaných prvků pro všech skupiny vzorků odebraných z Löw-Beerovy vily, byla cca o 37 % nižší než v přirozeném stavu.

Výsledný vztah závislosti pevnosti na vlhkosti ukazuje, že pevnost cihel při vyšším obsahu vlhkosti ve většině případů klesá. Tento vztah neplatí pro prvky typu D a F u kterých jsou pevnosti téměř konstantní při všech použitých vlhkostech. Největší pokles pevnosti v tlaku v závislosti na vlhkosti byl zaznamenán u vzorku typu E. Na tyto jevy by mohly mít vliv neanalyzované vlastnosti jako struktura, objem, typ pórů nebo způsob výpalu.

## 6. Závěr a doporučení

Při sanaci spodní stavby objektu vily Löw-Beerových v Brně, bylo nalezeno více typů cihelných prvků. Z jednotlivých prvků byly odebrány reprezentativní vzorky jednotlivých typů v různém množství kusů, které byly pro relevantní srovnání vystaveny rozdílným vlhkostním a teplotním vlivům. Typologicky definovaným cihlám byly na základě zkoušek stanoveny jejich základní fyzikálně mechanické vlastnosti. Souběžně s historickými zdíciemi prvky byly porovnávány i současné zdící materiály.

Řešeným problémem této práce, bylo zjištění závislosti pevnosti v tlaku za různých teplotních a vlhkostních poměrů.

Průměrné pevnosti v tlaku odebraných historických cihel byly v rozmezí 4,05 – 11,39 MPa s průměrnou hodnotou pevnosti 7,61 MPa. Hodnoty nasákavosti byly v intervalu 14,2 – 33,4 procent. Průměrnou hodnotou nasákavosti odebraných vzorků z vily je 22,9 procent.

Při sledování teplotních a vlhkostních vlivů na zkoušené vzorky, byly stanoveny vztahy mezi vlhkostí a pevností v tlaku, z níž byla zjištěna klesající tendence pevnosti za vyšší vlhkosti pro prvky typu A, B, C, D a F. Cihelné prvky typu D a F měly tuto tendenci malou nebo konstantní.

V rámci práce bylo provedeno měření vlhkosti a pevnosti v tlaku v daném objektu. Výsledné hodnoty vlhkosti zdiva, byly klasifikovány ve všech případech jako velmi suché zdivo. Průměrná pevnost v tlaku zjištěna metodou lokálního porušení na vytipovaných místech byla 11,1 MPa.

Analyzované historické zdivo nedisponovalo takovou homogenitou jako vybrané referenční cihelné prvky. Z výsledných hodnot je patrná různorodost historických kusů staviva .

Přes dlouhodobé teplotní, vlhkostní a jiné zatížení si zkoumané historické prvky zachovaly fyzikálně mechanické na takové úrovni, že pravděpodobně není žádné omezení k jejich dalšímu využití.

Vzhledem k nedostatečným informacím z hlediska původu, způsobu výroby, materiálového složení a dalších vlastností analyzovaných cihel, nelze zcela objasnit chování jednotlivých skupin prvků za určitých vlhkostí. Pro objektivnější hodnocení by bylo vhodné provedení dalších analytických zkoušek .

## **Poděkování**

Chtěl bych touto cestou poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Liboru Žídkovi, za vedení a cenné připomínky při zpracování.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Martinu Luňáčkoví, Ph.D. za umožnění provedení experimentální části na vybraném objektu.

.....  
Lukáš Bud'o

## Seznam použité literatury

- [1] Pytlík, P.: *Vlastnosti stavebních výrobků*, Brno: VUTIUM, 1998 ISBN 80-214-1123-6
- [2] Šponer, D., Šlapanský, B., Šebesta, C., Rozbořil, D., *Zpráva o provedení stavebně-technického a mykologického průzkumu objektu rodinné vily Löw-Beerů na ulici Drobného 22*, Brno: Stavební průzkumy; s.r.o., 2011
- [3] Balík, M.: *Odvhlčování staveb*, Praha Grada Publishing 2005 ISBN 80-247-0765-9
- [4] Svoboda, L.: *Stavební hmoty*, Praha Jaga Group, 2005 ISBN: 80-8076-007-1
- [5] Minke, G.: *Příručka hliněného stavitelství*, Bratislava 2009 ISBN 978-80-969698
- [6] Solař, J.: *Poruchy a rekonstrukce zděných staveb*, Praha: Nakladatelství Grada Publishing a.s., 2008, ISBN: 978-80-247-2672-4
- [7] Khestl, Filip.: *Zkoušení stavebních hmot a výrobků: Keramika [online]*, VŠB – TUO. [cit. 2140-04-25]. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=cihly>, J.:
- [8] Balík, M., Solař, J.: *100 tradičních stavebních detailů – Ochrana proti vodě*, Praha: Nakladatelství Grada Publishing a.s., 2011, ISBN: 978-80-247-3656-3
- [9] Witzany, J.: *Poruchy a rekonstrukce zděných budov*, Praha: Technická knižnice autorizovaného inženýra a technika ČKAIT, 1999, ISBN: 80-802687-5-3
- [10] Rovnaníková, P., Rovnaník, P., Křístek, R.: *Stavební chemie, modul 3: Degradace stavebních materiálů a chemie kovů*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební 2004 ISBN: 80-7204-410-9
- [11] ČSN 72 2600: *Cihlářské výrobky – Společná ustanovení*, Praha: Český normalizační institut, 1988.
- [12] ČSN EN 771-1: *Specifikace zdících prvků – Část 1: Pálené zdící prvky*, Praha: Český normalizační institut, 1988.
- [13] ČSN P 72 0610: *Hydroizolace staveb - Základní ustanovení*, Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [14] ČSN EN ISO 12570: *Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků – Stanovení vlhkosti sušení při zvýšené teplotě*, Praha: Český normalizační institut, 2001
- [15] ČSN EN 1052-1: *Zkušební metody pro zdivo – Část 1: Stanovení pevnosti v tlaku*, Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [16] ZLÍNSKÉ CIHELNY: Deklarované vlastnosti produktů. [online]. [cit. 2014-05-02].

Dostupné z: <http://www.cihelny-zlinsko.cz/prehled-vyrobků>

- [17] CIHELNA HRABCUK: Katalog produktů. [online]. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://cihelna.hrabcuk.cz/katalog.php>
- [18] WIENERBERGER: Tvarovka POROTHERM. [online]. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://www.wienerberger.cz/porotherm-50-eko.html?lpi=1119439164442>
- [19] VSEUMEL.CZ: Příčiny vlhkosti. [online]. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://vseumel.cz/view.php?priciny-nadmerne-vlhkosti-stavebnich-konstrukci-srazkova-voda&cislocclanku=2006092601>



## Seznam tabulek

- 1) Deklarované vlastnosti referenčního vzorku*
- 2) Klasifikace vlhkosti zdiva*
- 3) Výsledné hodnoty vlhkosti*
- 4) Výsledná pevnost zkoušky ze zkoušky Kučerovou vrtačkou*
- 5) Základní vlastnosti nalezených vzorků dle typologie*
- 6) Výsledné hodnoty nasákavosti*

## **Seznam obrázků**

- 1) *Cihla plná (CP)*
- 2) *Cihla odlehčená (CO)*
- 3) *Cihla děrovaná (CD)*
- 4) *Tvarovka*
- 5) *Příčiny vlhnutí zdiva*
- 6) *Vzlínající vlhkost*
- 7) *Působení biologických činitelů*
- 8) *Vadný svod*
- 9) *Výskyt solí ve zdivu*
- 10) *Löw-Beerova vila*
- 11) *Referenční vzorek z vrchu*
- 12) *Referenční vzorek z boku*
- 13) *Měření odporovým vlhkoměrem*
- 14) *PZZ01*
- 15) *Měření hloubky vrtu*
- 16) *Vzorek typ A*
- 17) *Vzorek typ B*
- 18) *Vzorek typ C*
- 19) *Vzorek typ D*
- 20) *Vzorek typ E*
- 21) *Vzorek typ F*
- 22) *Var při zkoušce nasákavosti*
- 23) *Vychladlé vzorky*
- 24) *Průměrná nasákavost jednotlivých skupin vzorků*
- 25) *Nárůst vlhkosti při 5 °C*
- 26) *Nárůst vlhkosti při 25 °C*
- 27) *Měření pevnosti v tlaku*
- 28) *Průměrná pevnost jednotlivých vzorků*
- 29) *Průměrná pevnost jednotlivých skupin vzorků*
- 30) *Pevnost saturovaných vzorků*
- 31) *Graf závislosti pevnosti v tlaku na vlhkosti*

**Seznam použitých vzorců**

$$1) \text{ Výška vztlínání: } h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \Theta}{r \cdot \rho \cdot g} \quad [\text{m}]$$

$$2) \text{ Kelvinova rovnice: } \frac{P}{P_0} = - \frac{\sigma}{R \cdot T \cdot \rho \cdot r}$$

$$3) \text{ Doba vysušení: } t = S \cdot d^2 \quad [\text{dny}]$$

$$4) \text{ Objemová hmotnost: } \rho = \frac{m_s}{V} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

$$5) \text{ Vlhkost materiálu: } w = \frac{m_w - m_o}{m_o} \quad [\%]$$

$$6) \text{ Výpočet nasákavosti: } NV = \frac{m_n - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad [\%]$$

$$7) \text{ Pevnost v tlaku: } R = \frac{F}{A_z} \cdot 1000 \quad [\text{MPa}]$$

$$8) \text{ Kalibračního koeficientu: } c = \frac{w_g}{\Delta R_c} \quad [-]$$

$$9) \text{ Kalibrační vztah pro výpočet vlhkosti odporovým vlhkoměrem: } w_o = \Delta R_o \cdot c \quad [\%]$$

$$10) \text{ Výběrový průměr: } R_m = \frac{\sum_{i=1}^n R_{m,i}}{n} \quad [\text{MPa}]$$

$$11) \text{ Výběrová směrodatná odchylka } S_{r,i} = \frac{1}{n-1} * \sqrt{\sum (R_{m,i} - R_m)^2} \quad [\text{MPa}]$$

$$12) \text{ Výpočet pevnosti pro danou oblast: } R_{Cl} = R_m - t_n \cdot S_r \quad [\text{MPa}]$$

## **Seznam příloh**

PŘÍLOHA I - Naměřené hodnoty IN SITU

PŘÍLOHA II - Laboratorní zkoušky

PŘÍLOHA III - Kalibrační vztah pro vrtačku typu PZZ 01 – pro cihly (stupeň č. 2)